

COMPORTAMENTO DA LIGAÇÃO DE LAMINADOS DE CFRP INSERIDOS NO BETÃO SOB ACÇÕES CÍCLICAS

J. SENA CRUZ
Aluno de Doutoramento
Universidade do Minho
Guimarães

Joaquim BARROS
Professor Auxiliar
Universidade do Minho
Guimarães

Ravindra GETTU
Director do LTE-UPC
Universidade Politécnica da
Catalunha
Barcelona

SUMÁRIO

Com o objectivo de avaliar a influência do comprimento de aderência e da história do carregamento no comportamento da ligação de laminados de fibras de carbono (CFRP) ao betão, foram efectuadas campanhas de ensaios com três comprimentos de aderência distintos e diferentes tipos de história de carga. O CFRP é inserido em ranhuras efectuadas no betão e é fixo ao betão por intermédio de um adesivo epoxy. No presente trabalho, os ensaios de arranque em flexão efectuados são descritos e os resultados obtidos são apresentados e analisados.

1. INTRODUÇÃO

A técnica de reforço baseada na inserção de laminados de CFRP no betão de recobrimento tem sido objecto de estudo nos últimos anos. Os laminados têm secção transversal rectangular de aproximadamente $10 \times 1.5 \text{ mm}^2$ e são fixos ao betão por intermédio de um adesivo epoxy.

Ensaios efectuados em pilares [1], vigas [2,3] e painéis de alvenaria [4] revelaram que a presente técnica é bastante promissora dado que, em comparação com as técnicas de reforço que recorrem à colagem externa do CRFP [5], são mobilizados níveis mais elevados de tensão nos CFRP, a resistência ao fenómeno de *peeling* é maior, bem como a capacidade deformacional dos elementos reforçados. Esta técnica também garante maior protecção ao fogo e a actos de vandalismo, bem como maior resistência a danos devidos a acções mecânicas.

Com vista à detecção e interpretação dos mecanismos de fixação do laminado ao betão, Sena-Cruz e Barros [6] efectuaram uma campanha de ensaios de arranque em flexão. A influência do comprimento de aderência do laminado e da classe de resistência do betão foram os parâmetros analisados. Com base nessa campanha foi possível constatar que, com o aumento do comprimento de aderência e da força instalada no laminado, o deslizamento correspondente à força máxima e o rendimento do laminado aumentaram.

Com o propósito de investigar o comportamento desta ligação sob acções cíclicas, procedeu-se à realização de uma campanha de ensaios de arrancamento em flexão, tendo sido analisada a influência do comprimento de aderência e da história de carga. No presente trabalho descrevem-se os ensaios realizados e os resultados obtidos são apresentados e analisados.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Configuração de ensaio

Na Figura 1 representa-se a configuração de ensaio adoptada no programa experimental efectuado que teve como base a proposta da RILEM [7] para a caracterização da ligação de armaduras convencionais ao betão. A partir desta figura é possível verificar que o provete era constituído por dois blocos (A e B), ligados entre si a meio vão por intermédio de uma rótula metálica na parte superior, e pelo laminado, na parte inferior. Por forma a concentrar a zona de estudo no bloco A, o comprimento de aderência do laminado de CFRP ao betão foi de 225 mm no bloco B, enquanto no bloco A utilizaram-se distintos comprimentos de aderência (L_b).

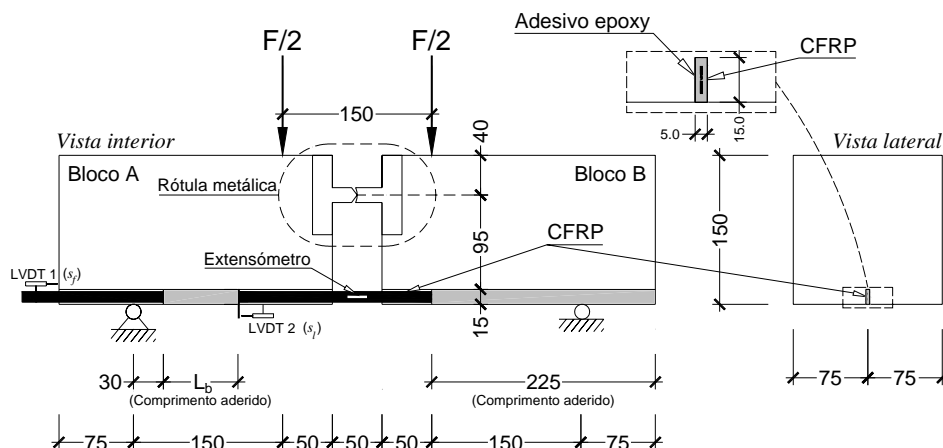


Figura 1: Configuração de ensaio: provete e instrumentação utilizada

Para efectuar a medição do deslocamento laminado em relação ao betão (deslizamento) utilizaram-se dois transdutores de deslocamento (LVDT1 e LVDT2). Assim, o LVDT1 registou o deslizamento no final da zona livre, s_f , enquanto que o LVDT2 mediu o deslizamento no final da zona carregada (s_l). A força aplicada foi determinada com recurso a uma célula de carga. Para medir a deformação ocorrida no laminado, a meio vão da viga, utilizou-se um extensómetro

colado ao CFRP. Os ensaios foram efectuados numa máquina servo-controlada (Instron - series 8505), sob controlo de deslocamentos à velocidade de 5 $\mu\text{m/s}$, tendo-se utilizado para tal o transdutor LVDT2.

2.2. Campanha de ensaios

O comprimento de aderência e a história do carregamento, foram os dois parâmetros analisados no programa experimental. Para tal, consideram-se três comprimentos de aderência distintos, $L_b=60, 90$ e 120 mm, e três tipos de carregamento distintos: monotónicos (M); 1 ciclo de carga/descarga para diferentes níveis de deformação (C1); 10 ciclos de carga/descarga para um determinado nível de força. No Quadro 1 apresentam-se as designações adoptadas para as diferentes séries que constituem o programa experimental. Cada série era constituída por três provetes, designados por B1, B2 e B3.

Quadro 1: Designações adoptadas para as séries de ensaios

Comprimento de aderência (mm)	Tipo de carregamento	Designação
60 ($L_b = 60$)	Monotónico (M)	Lb60_M
	Cíclico (C10) ^a	Lb60_C10
90 ($L_b = 90$)	Monotónico (M)	Lb90_M
	Cíclico (C10) ^b	Lb90_C10
120 ($L_b = 120$)	Monotónico (M)	Lb120_M
	Cíclico (C10) ^c	Lb120_C10
	Cíclico (C1) ^d	Lb120_C1

^a 10 ciclos de carga/descarga para 90% da força máxima de arranque.

^b 10 ciclos de carga/descarga para 60% da força máxima de arranque.

^c 10 ciclos de carga/descarga para 75% da força máxima de arranque.

^d 1 ciclo de carga/descarga aos 0.25 mm, 0.50 mm, 0.75 mm, 1.0 mm, 1.50 mm, 2.00 mm, 3.00 mm, 4.00 mm

2.3. Preparação dos provetes

Os provetes confeccionados foram retirados da câmara húmida aos 28 dias de idade para serem efectuadas as ranhuras. As ranhuras foram realizadas por intermédio de equipamento apropriado. Em seguida os provetes eram sujeitos ao processo de secagem durante duas semanas, à temperatura ambiente. Antes da fixação do laminado ao betão, as dimensões da ranhura na zona de estudo foram medidas, tendo-se obtido os valores de 14.72 ± 0.28 mm e 4.79 ± 0.12 mm para a profundidade e largura, respectivamente. A preparação do laminado de CFRP incluiu a sua limpeza com recurso a um solvente (acetona), a colagem de extensómetro e a fixação de um dispositivo auxiliar para a medição do deslizamento no final da zona carregada. As ranhuras eram limpas com recurso a ar comprimido. O adesivo epoxy foi preparado de acordo com as indicações do fabricante, tendo sido aplicado nas ranhuras e no laminado. Este era introduzido nas ranhuras de forma suave, retirando-se em seguida o adesivo em excesso.

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Nesta secção apresenta-se um resumo dos resultados obtidos na caracterização dos materiais utilizados na campanha de ensaios realizada. Mais detalhes podem ser encontrados noutra publicação [8].

Para confeccionar os provetes de betão efectuaram-se duas amassaduras. A determinação da classe de resistência do betão foi efectuada por intermédio de ensaios de compressão em cilindros de 150 mm de diâmetro e 300 mm de altura à velocidade de 0.5 MPa/s, tendo-se obtido os valores de 40.9 ± 0.9 MPa e 41.0 ± 1.0 MPa, para a primeira e segunda amassadura, respectivamente.

Para determinar as características geométricas da secção transversal do laminado de CFRP, efectuaram-se vinte medições tendo-se obtido os valores de 10.03 mm e 1.40 mm para largura e espessura, respectivamente. O comportamento à tracção dos laminados foi avaliado por intermédio de ensaios à tracção em conformidade com a norma ISO 527-5 [9]. Para a tensão de rotura, o módulo de elasticidade e a extensão na rotura obtiveram-se os valores de 2833.3 ± 161.5 MPa, 171.1 ± 1.4 GPa e 1.55 ± 0.10 %, respectivamente.

Na caracterização do adesivo epoxy efectuaram-se ensaios de flexão e compressão tendo como base as recomendações da NP 196-1 [10]. Contudo, procedeu-se à modificação de alguns parâmetros incluídos na norma de forma a ter em conta a especificidade do material [8]. Para tensão de tracção em flexão e tensão de compressão obtiveram-se os valores de 21.8 ± 5.5 MPa e 67.5 ± 3.6 MPa, respectivamente.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Ensaios monotónicos

Na Figura 2 (a) apresenta-se a evolução típica, ao longo do tempo, do deslizamento no final da zona livre, s_f , e final da zona carregada, s_l . Como seria de esperar o s_l apresenta uma evolução linear, pois trata-se do deslizamento de controlo do ensaio. Observa-se que o s_f apresenta um comportamento não linear. Na Figura 2 (b) a evolução típica, ao longo do tempo, de s_f , s_l e da força de arranque no final da zona carregada, F_l , é representada. Da análise deste diagrama é possível distinguir quatro ramos de comportamento distintos, a saber:

- AB onde só ocorre deslizamento no final da zona carregada;
- BC observa-se deslizamento no final da zona livre e no final da zona carregada. Contudo, o deslizamento no final da zona livre é marginal;
- CD verifica-se que a velocidade de deslizamento da zona livre é superior à velocidade de deslizamento no final da zona carregada;
- DE ambos os deslizamentos apresentam velocidade idêntica.

A justificação da existência destes quatro ramos poderá ser encontrada noutra publicação [6].

Para cada provete foram determinados os valores da razão F_l/F_{lmax} nos pontos B, C e D, em que F_l é o valor da força de arranque no final da zona carregada nos pontos B, C e D e F_{lmax} o máximo valor da força de arranque alcançado. No Quadro 2 apresentam-se os valores médios obtidos em

cada série. A partir deste conclui-se que o valor de F_l no ponto C ocorre para o valor de F_{lmax} , enquanto que os valores de F_l nos pontos B e D ocorrem para valores da ordem dos 20% e 65%, respectivamente. A grande dispersão obtida para o ponto B poderá estar associada a dificuldades na determinação do ponto B e à falta de precisão do LVDT.

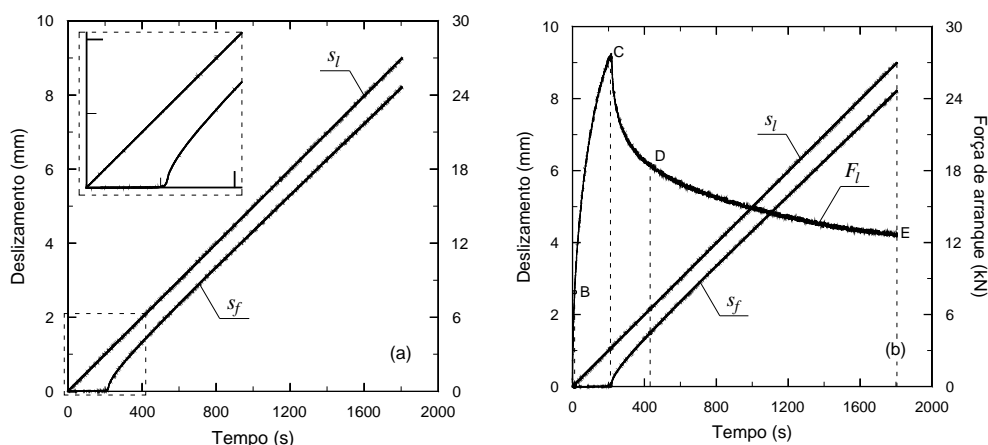


Figura 2: Evolução ao longo do tempo do deslizamento no final da zona livre, s_f e zona carregada, s_l , (a) e da força de arranque, F_l , s_f e s_l (b) para o provete B3_Lb120_M

Quadro 2: Valores médios da razão F_l/F_{lmax} para os pontos B, C e D

Série	Razão F_l/F_{lmax}		
	B	C	D
Lb60_M	0.180 (43.9%)	0.996 (0.5%)	0.598 (3.5%)
Lb90_M	0.246 (66.1%)	0.989 (0.5%)	0.654 (1.4%)
Lb120_M	0.229 (20.9%)	0.993 (0.5%)	0.669 (2.4%)

Nota: os valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação

Na Figura 3 (a) e (b) apresentam-se as relações F_l-s_f e F_l-s_l , respectivamente, para a série Lb120_M. A força de arranque foi determinada com base nos valores registados na extensometria [8]. Da análise das curvas F_l-s_l verifica-se que, após uma curta fase em regime elástico linear, ocorre um comportamento eminentemente não linear. Após a carga de pico, a força diminui para deslizamento crescente. Na fase inicial do amolecimento ocorre uma acentuada queda da força de arranque, muito provavelmente consequência da perda de aderência entre o laminado e o adesivo e entre este e o betão. Segue-se uma fase com reduzida perda de resistência residual ao corte, que se julga ser devida ao atrito entre o laminado e o adesivo e entre este e o betão envolvente. Da análise das curvas F_l-s_f , observa-se que até à carga de pico, o deslizamento é praticamente nulo. A partir desta, verifica-se um comportamento similar ao observado nas curvas F_l-s_l . Comportamentos similares foram observados nas restantes séries (Lb60_M e Lb90_M).

O Quadro 3 inclui para cada série os valores médios dos principais parâmetros analisados: deslizamento máximo no final da zona livre e carregada, s_{fmax} e s_{lmax} , respectivamente; máxima

força de arranque no final da zona carregada, F_{lmax} ; máxima tensão de corte, τ_{max} , definida pela razão entre F_{lmax} e a área de contacto do laminado de CFRP e o adesivo na zona de aderência; relação entre a tensão máxima instalada no laminado e a sua resistência última, σ_{lmax}/f_{fu} ; relação entre a tensão última de corte e a tensão máxima de corte, τ_r/τ_{max} . Assim, é possível concluir que:

- de uma forma geral, os valores dos coeficientes de variação obtidos para os parâmetros analisados são baixos. A exceção ocorre para s_{fmax} e s_{lmax} ;
- o valor de s_{fmax} parece ser insensível ao valor do comprimento de aderência. Todavia, tal comportamento dever-se-à, provavelmente, à falta de precisão dos transdutores de deslocamentos utilizados;
- os parâmetros s_{lmax} e F_{lmax} , têm comportamento similar, verificando-se que aumentam com o aumento de Lb;
- τ_{max} diminui com o aumento do comprimento de aderência;
- o rendimento do laminado, avaliado por intermédio da razão σ_{lmax}/f_{fu} , aumenta com o valor de Lb, obtendo-se para Lb=120 um rendimento na ordem dos 70%;
- a razão τ_r/τ_{max} para Lb=90 e 120 é sensivelmente igual, podendo ser indicador que a tensão residual tende para um valor constante.

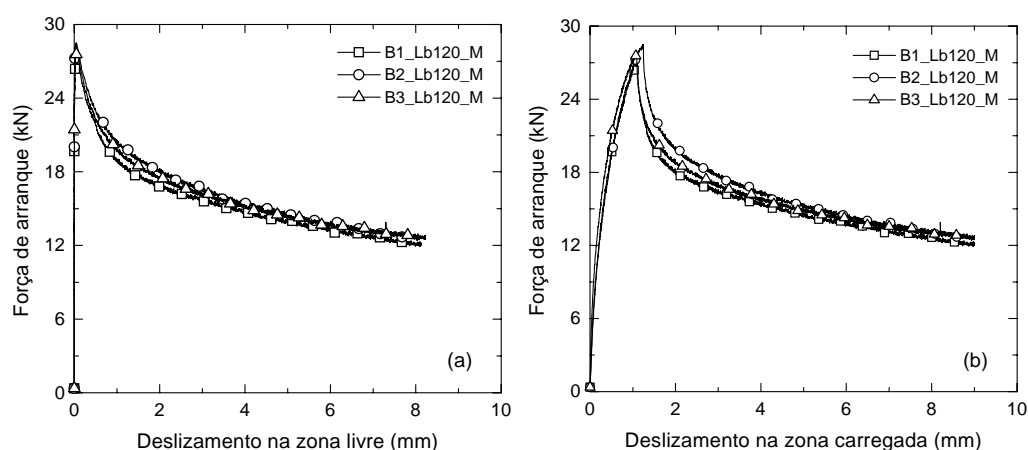


Figura 3: Relação força de arranque vs. deslizamento no final da zona livre (a) e vs. deslizamento no final da zona carregada (b) para a série Lb120_M

Quadro 3: Valores médios dos principais parâmetros analisados (ensaio monotónicos)

Series	s_{fmax} (mm)	s_{lmax} (mm)	F_{lmax} (kN)	τ_{max} (MPa)	σ_{lmax}/f_{fu} (%)	τ_r/τ_{max} (-)
Lb60_M	0.06 (19.83%)	0.43 (11.25%)	18.66 (5.14%)	13.60 (5.14%)	47.45 (5.14%)	0.39 (8.27%)
Lb90_M	0.03 (35.44%)	0.79 (9.02%)	23.86 (4.09%)	11.60 (4.09%)	60.69 (4.09%)	0.44 (4.36%)
Lb120_M	0.06 (22.01%)	1.13 (8.09%)	27.74 (2.78%)	10.11 (2.78%)	70.54 (2.78%)	0.45 (2.34%)

Nota: os valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação

4.2. Ensaios cíclicos

As relações deslizamento vs. força de arranque para os provetes da série Lb120_C1 encontram-se representadas na Figura 4. Nestes diagramas também foi incluída a curva média obtida na correspondente série de ensaios monotónicos. Com base na análise destes diagramas, constata-se que a “envolvente” monotónica de cada provete tem um comportamento similar ao registado nos ensaios monotónicos. De uma forma geral, o comportamento observado é idêntico ao observado na ligação de armaduras convencionais ao betão [11], em que após a carga de pico a ligação exibe essencialmente, um comportamento plástico.

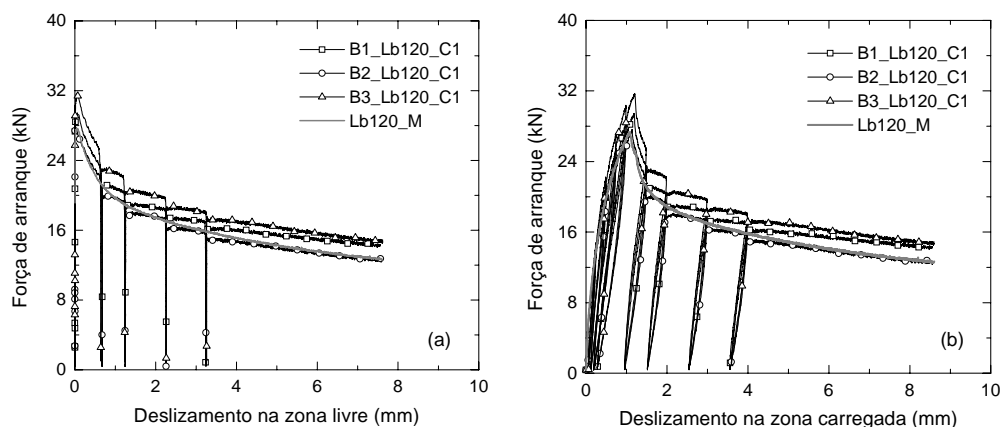


Figura 4: Relação força de arranque vs. deslizamento no final da zona livre (a) e vs. deslizamento no final da zona carregada (b) para a série Lb120_C1

No Quadro 4 resumem-se os principais parâmetros analisados. Comparando-os com a série monotónica homóloga (Lb120_M), verifica-se que a série Lb120_C1 apresenta valores ligeiramente superiores aos da série Lb120_M, não tendo sido encontrada nenhuma razão que justifique tal resultado.

Quadro 4: Valores médios dos principais parâmetros analisados (ensaios cíclicos)

Series	s_{fmax} (mm)	F_{lmax} (kN)	τ_{max} (MPa)	σ_{lmax}/f_{tu} (%)	τ_r/τ_{rmax} (-)
Lb120_C1	1.18 (2.81%)	29.61 (6.89%)	10.82 (6.89%)	75.53 (6.89%)	0.47 (4.33%)
Lb60_C10	0.35 (13.43%)	16.60 (5.19%)	12.10 (5.19%)	42.22 (5.19%)	0.33 (8.10%)
Lb90_C10	0.69 (11.96%)	22.16 (4.67%)	10.77 (4.67%)	56.35 (4.67%)	0.42 (5.25%)
Lb120_C10	1.20 (8.36%)	28.76 (4.09%)	10.48 (4.09%)	73.15 (4.09%)	0.48 (4.74%)

Nota: os valores entre parêntesis correspondem ao coeficiente de variação

Na Figura 5 (a) representa-se, a título exemplificativo, a determinação da evolução da degradação de rigidez ao longo do ensaio do provete B1_Lb120_C1. Esta rigidez definiu-se como sendo a inclinação da recta que passa pelo pontos de maior e menor força de arranque da curva descarga/carga. Na Figura 5 (b) apresenta-se a evolução da degradação de rigidez da série Lb120_C1. A partir deste diagrama constata-se que a evolução da degradação de rigidez pré e pós pico apresenta tendências distintas. A principal razão para este comportamento, provavelmente, está associada ao facto dos mecanismos de transferência de tensões entre o betão e o laminado serem distintos na fase de pré e pós pico, sendo neste último, essencialmente, friccional.

A resposta típica força de arranque vs. deslizamento no final da zona carregada para as série Lb60_C10, Lb90_C10 e Lb120_C10 encontra-se ilustrada na Figura 6 por intermédio da série Lb120_C10. Nesta, também se inclui a curva média da série Lb120_M. A partir destes diagramas é possível concluir quem, tal como na série Lb120_C1, a “envolvente” monotónica tem comportamento similar ao registado nos ensaios monotónicos. É possível constatar que durante os ciclos de carga/descarga existe diminuição da resistência. Contudo, prosseguindo com o ensaio verifica-se que a carga máxima não sofre significativa alteração (ver Quadro 4).

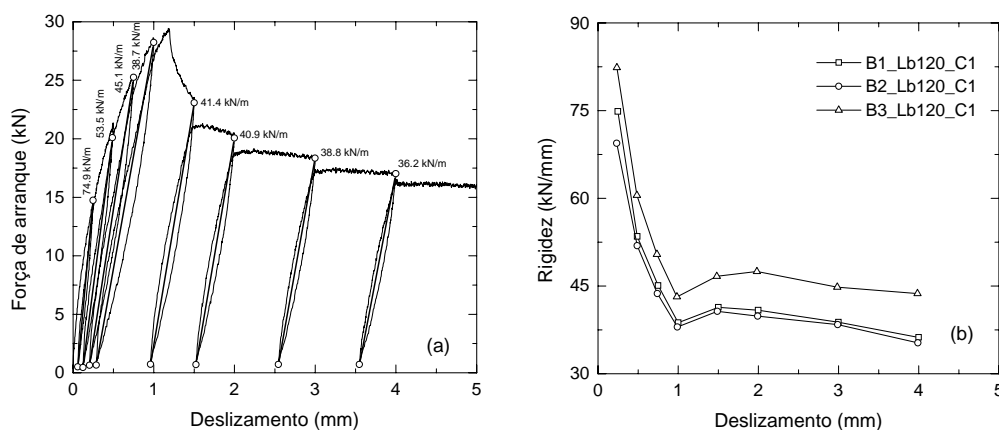


Figura 5: Evolução da degradação de rigidez para o provete B1_Lb120_C1 (a) e para a série Lb120_C1 (b)

A evolução da força de arranque ao longo dos 10 ciclos de carga/descarga encontra-se representada na Figura 7. Neste diagrama a força de arranque encontra-se normalizada, i.e., dividida pela máxima força de arranque observada durante cada ensaio. A partir deste gráfico pode-se concluir que a degradação de resistência pré-pico para um conjunto de 10 ciclos de carga/descarga com a mesma amplitude é independente do nível de carga seleccionado. A excepção verifica-se para o provete B3_Lb60_C10. Na realidade neste provete o conjunto dos 10 ciclos de carga/descarga foi efectuado, sensivelmente, para a carga de pico.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho descrevem-se e apresentam-se os principais resultados obtidos no programa de ensaios de arranque em flexão efectuados. Com estes ensaios pretendeu-se avaliar a influência do comprimento de aderência e da história do carregamento no comportamento da ligação de

laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento. Dos ensaios monotónicos efectuados verificou-se que a máxima força de arranque e correspondente deslizamento aumentaram com o comprimento de aderência (Lb). Também se constatou que a tensão média de corte diminuiu com Lb. Dos ensaios cíclicos efectuados verificou-se que a ligação betão/laminado tem comportamento distinto na fase de pré e pós pico. Apesar da ligação apresentar degradação de resistência durante os ciclos de carga/descarga, desde que estes se efectuem na fase de pré-pico a resistência máxima não é alterada. Por último, pode-se dizer que a “envolvente” dos ensaios cíclicos é sensivelmente idêntica à resposta obtida nos ensaios monotónicos.

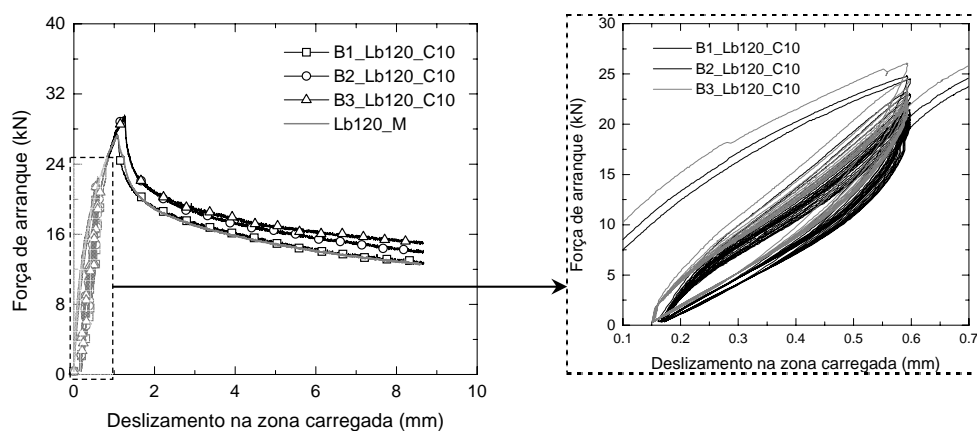


Figura 6: Relação força de arranque vs. deslizamento no final da zona carregada na série Lb120_C10

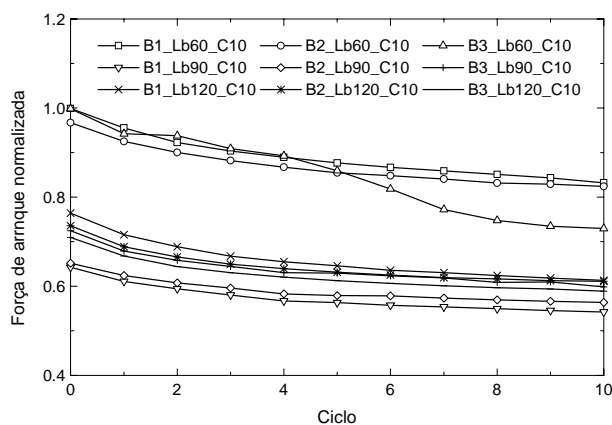


Figura 7: Evolução da força de arranque normalizada em função do número de ciclos

6. AGRADECIMENTOS

Os autores do trabalho agradecem a colaboração prestada pelos funcionários do Laboratório de Tecnologia de Estruturas da *Universitat Politècnica de Catalunya*, em especial ao Sr. Miguel Martin e ao Sr. Ernesto Diaz. Às empresas que gentilmente forneceram os materiais utilizados na campanha de ensaios, Bettor MBT, Cimentos Molins e Grace, os autores manifestam agradecimentos. O primeiro autor agradece a bolsa SFRH/BD/3259/2000 da FCT e FSE.

7. REFERÊNCIAS

- [1] Ferreira, D. - *Pilares de Betão Armado Reforçados com Laminados de Fibras de Carbono*. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2000.
- [2] Barros, J.; Fortes, A. - "Concrete beams reinforced with carbon laminates bonded into slits." *5º Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*, Madrid, 2002, 16 p.
- [3] Barros, J.; Dias, S. - "Shear strengthening of reinforced concrete beams with laminate strips of CFRP." *International Conference of Composites in Construction*, Cosenza, Itália, 2003, p. 289-294.
- [4] Fortes, A.; Oliveira, J.; Barros, J. - "Elementos de casca em alvenaria cerâmica reforçados com laminados de fibras de carbono." *VII International Seminar on Structural Masonry for Developing Countries*, Brasil, 2002.
- [5] CEB-FIP - *Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*. Technical report on the Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (FRP EBR) for reinforced concrete structures, prepared by a working party of the Task Group 9.3 FRP (Fibre Reinforced Polymer) reinforcement for concrete structures, 2001, 130 p.
- [6] Sena-Cruz, J.; Barros, J. - *Caracterização experimental da ligação de laminados de CFRP inseridos no betão de recobrimento*. Relatório técnico No. 02-DEC/E-15, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2002, 54 p.
- [7] RILEM - *Bond test for reinforcement steel. 1. Beam test*. TC9-RC, 1982.
- [8] Sena-Cruz, J.; Barros, J.; Gettu, R. - *Bond behavior of Near-Surface Mounted CFRP laminate strips under generalized excitations*. Relatório técnico No. 04-DEC/E, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, 2004.
- [9] ISO 527-5 - *Plastics - Determination of tensile properties – Part 5: Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites*. International Organization for Standardization, Genève, Switzerla, 1997.
- [10] NP 196-1- *Métodos de ensaio de cimentos*. Instituto Português da Qualidade, Lisboa, 1990, 29 p.
- [11] Eligehausen, R.; Popov, E.; Bertero, V. - *Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations*. Relatório técnico No. UCB/EERC-83/23, Outubro, 1983, 162 p.